

有限梯度层滑动热接触的研究*

陈培见 陈少华

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 本文主要研究了有限厚度的梯度薄层的滑动热接触问题, 刚性的平压头在梯度膜层上以速度 V 缓慢匀速滑动 (从而忽略动态效应, 考虑成稳态热力学问题分析)。由于接触摩擦的影响, 压头和膜层表面会产生热场, 假定产生的热量与接触压应力、摩擦系数以及摩擦速度成正比。利用传递矩阵和 Fourier 变化, 得到 Cauchy 奇异积分方程, 通过数值求解, 得出摩擦速度、摩擦系数、膜层厚度等参数对表面接触应力、平面内应力以及应力强度因子的影响。结果表明: 改变这些参数能够有效地提高膜层的抗磨损性能。

关键词: 热接触, 梯度膜层, 奇异积分方程

一、引言

新材料是指新出现或正在发展中的、具有传统材料所不具有的优异性能的材料。梯度材料就是一种越来越受科学家和工程师重视的新型材料, 它是指材料组分在某一空间方向上呈现连续变化的一种典型的复合材料^[1]。梯度材料作为材料设计规范性的概念是由日本学者于 20 世纪 80 年代首先提出。目前梯度材料的研究引起了人们的广泛关注, 已经成为力学、材料学等领域的最活跃的方向之一。梯度材料的研究最初集中在其在高温环境下的优异的热机械性能 (如航空航天领域) 探索, 其应用正逐步扩展至核能、电子、化工、生物医学、建筑等众多工程技术领域, 即在常温下也有着广泛的应用前景, 其中的力学问题同样为力学工作者所关注。最近的研究发现仅通过控制功能材料的模量变化就能够有效地减小接触所产生的变形和破坏, 这是常规材料所不可比拟的。Giannakopoulos 和 Suresh^[2]研究了功能梯度半空间在集中载荷、球形和圆锥形压头作用下的二维接触问题的解析解。Guler 和 Erdogan^[3]系统分析了材料呈现指数变化的功能梯度涂层在刚性压头下的二维接触问题。Dag 和 Erdogan^[4]又进一步分析了功能材料与裂纹的耦合问题。Wang^[5]等人提出了一种线性分层的模型, 系统地分析了功能材料的平面接触、轴对称接触以及微动接触问题。然而, 这些分析中都没有考虑摩擦引起的热场的效应。目前, 仅有很少的文章涉及了梯度材料的热弹性接触问题, 而且这些文章中都是把接触物体考虑成无限大空间或者平面来考虑, 而考虑成一个有限尺寸的膜层则更为合理。本文主要分析了平面应变下有限梯度膜层的滑动热接触问题, 梯度变化采用指数模型, 最后给出表面接触应力、平面内主应力以及应力集中因子的变化。

二、接触模型和理论分析

对于该滑动热接触问题, 我们建立的模型为: 一个厚度为 h 的梯度膜层上部与一个刚性平压头接触, 摩擦力满足库伦摩擦定律, 摩擦产生的热流流入膜层内, 膜层下部固

电子邮件: chenshaohua72@hotmail.com (陈少华).

国家自然科学基金: (10972220、10732050、11021262).

定在一个刚性基础上, 为了处理方便, 假定底部的温度保持不变。通过分析, 我们可以得到的控制方程为:

膜层表面 ($x=0$) 的位移为:

$$\frac{\partial u(0, y)}{\partial y} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-a}^{+a} [iI_{11}(y, r)\sigma_{xx}(0, r) - I_{12}(y, r)\tau_{xy}(0, r) + iI_{13}(y, r)q_f(r)] dr \quad (1)$$

$$\frac{\partial v(0, y)}{\partial y} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-a}^{+a} [I_{21}(y, r)\sigma_{xx}(0, r) + iI_{22}(y, r)\tau_{xy}(0, r) + I_{23}(y, r)q_f(r)] dr \quad (2)$$

获得了接触应力以后, 可由 $\sigma_{xx}(0, y) = -p(y)$, $\sigma_{xy}(0, y) = -\mu_f p(y)$ 和 $q_f(y) = \mu_f V p(y)$ 得到平面内主应力为:

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}(0, y) = & -p(y) + \frac{2\mu_f}{\pi} \int_{-a}^a \frac{1}{r-y} p(r) dr \\ & - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a \frac{1}{\Lambda_{22}} Q_2(r, y) p(r) dr + \frac{2\alpha_1^*}{\Lambda_{22}} \Theta(0, y) \end{aligned} \quad (3)$$

定义应力强度因子来表征接触边界处的应力集中情况:

$$F_I(a) = \lim_{y \rightarrow a} \frac{p(y)}{2^{\beta_2}} (a-y)^{-\beta_1} = \frac{2\sigma_0}{a^{\beta_1}} \sum_{j=0}^{\infty} c_j^* P_j^{(\beta_1, \beta_2)}(1) \quad (4)$$

$$F_I(-a) = \lim_{y \rightarrow -a} \frac{p(y)}{2^{\beta_1}} (a+y)^{-\beta_2} = \frac{2\sigma_0}{a^{\beta_2}} \sum_{j=0}^{\infty} c_j^* P_j^{(\beta_1, \beta_2)}(-1) \quad (5)$$

三、结论

本文研究了平压头与有限厚度的梯度膜层的摩擦热接触问题, 得到了表面接触应力、平面内的正应力以及应力强度因子。通过分析它们受滑动速度、膜层厚度和摩擦系数等参数的影响, 我们发现改变它们可以有效地提高膜层的抗磨损性能。主要结论包括:

(1) 平压头的后缘比前缘具有更大的应力奇异性。

(2) 梯度模量比 μ_1/μ_2 对接触应力和平面应力有很大的影响, 梯度膜层较软的表面可以有效地避免因摩擦产生的裂纹。减少摩擦系数、膜层厚度和增加滑动速度同样可以减少平面正应力的大小, 从而降低裂纹的产生。

参 考 文 献

- 1 S. Suresh. Graded materials for resistance to contact deformation and damage. Science. 2001; 292: 2447-2451.
- 2 A. E. Giannakopoulos and P. Pallot. Two-dimensional contact analysis of elastic graded materials. J. Mech. Phys. Solids. 2000; 48: 1597-1631.
- 3 M. A. Guler and F. Erdogan. Contact mechanics of graded coatings. Int. J. Solids Struct. 2004; 41: 3865-3889.
- 4 S. Dag and F. Erdogan. A surface crack in a graded medium loaded by a sliding rigid stamp. Eng. Fract. Mech. 2002; 69: 1729-1751.
- 5 L. L. Ke and Y. S. Wang. Two-dimensional contact mechanics of functionally graded materials with arbitrary spatial variations of material properties. Int. J. Solids Struct. 2006; 43: 5779-5798.